

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh implementace technologie SNCR pro denitrifikaci spalin

Proposal for Implementation of SNCR Technology for Flue Gas Denitrification

Student:

Petr Laštuvka

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.

Ostrava 2019

# Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Laštuvka**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení

Téma: **Návrh implementace technologie SNCR pro denitrifikaci spalín**  
**Proposal for Implementation of SNCR Technology for Flue Gas Denitrification**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Navrhnete koncept implementace technologie SNCR denitrifikace spalín pro vybraný práškový kotel s cílem dosažení emisních limitů NO<sub>x</sub>.

## Práce bude obsahovat:

- Základní popis sekundárních technologií denitrifikace spalín v energetice
- Základní popis relevantních částí technologie, zařízení
- Výpočet základních toků medií
- Koncepční návrh technologie a umístění trysek ve spalovací komoře
- Výkresovou dokumentaci

## Seznam doporučené odborné literatury:

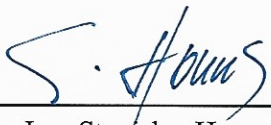
BLEJCHAŘ, T.: *Návody do cvičení „Modelování proudění“-CFX*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2050-7.  
ČERNÝ, V. a kol.: *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983.  
VEJVODA, J., MACHAČ, P., BURYAN, P.: *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. VŠCHT Praha, 2003. ISBN 80-7080-517-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.05.2019

  
.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo;
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst.3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické podobě v databázi Ústřední knihovny VŠB-TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě: 20.05.2019.....

  
.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Laštuvka

Adresa trvalého pobytu autora práce: Nádražní 2681/56, 702 00 Moravská Ostrava

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

LAŠTUVKA, P. Návrh implementace technologie SNCR pro denitrifikaci spalín: bakalářská práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2019, 40 s. Vedoucí práce: Szeliga, Z.

Bakalářská práce se zaměřuje na problém redukce oxidů dusíku pomocí technologie SNCR. Teoretická část se zabývá rozdělením metod snížení emisí a jejich chemickou podstatu. V praktické části je vyhotoveno měření teplot s návrhem na vstřikovací úrovně a matematický výpočet pro určení minimální spotřeby aditiva k používání technologie.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

LAŠTUVKA, P. Proposal for Implementation of SNCR Technology for Flue Gas Denitrification. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy, 2019, 40 p. Thesis head: Szeliga, Z.

The Bachelor thesis focuses on the problem of nitrogen oxide reduction using SNCR Technology. The theoretical part deals with the distribution of emission reduction and their chemical principle. In the practical part is made temperature measurement with proposal for injection levels and mathematical calculation for determination of minimal consumption of technology.

## Obsah

1	Úvod .....	8
2	Vliv oxidů dusíku na biosféru.....	10
3	Vznik oxidů dusíku.....	10
3.1	Vysokoteplotní oxidy dusíku .....	10
3.2	Palivové oxidy dusíku .....	11
3.3	Promptní oxidy dusíku .....	11
3.4	Tvorba NO <sub>2</sub> a N <sub>2</sub> O.....	11
4	Snížování emisí oxidů dusíku.....	11
4.1	Primární opatření.....	12
4.2	Sekundární opatření.....	12
5	Metoda SNCR.....	12
5.1	Jednotlivé části technologie SNCR.....	14
6	Metoda SCR.....	16
7	Chemizmus procesu.....	18
8	Popis kotle .....	19
9	Měření teplot.....	20
10	Výsledky měření .....	25
11	Návrh prostupů do SK kotle.....	33
12	Výpočet spotřeby močoviny .....	33
13	Závěr .....	38
14	Použitá literatura .....	39
15	Seznam příloh .....	40

## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Popis
$M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	Hmotnost $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
$M_{2\text{NO}}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	Hmotnost $2\text{NO}$
$M_{\text{NO}}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	Hmotnost $\text{NO}$
$M_{\text{NO}_2}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	Hmotnost $\text{NO}_2$
$c$	%	Koncentrace roztoku močoviny
$\alpha$	-	Stechiometrický přebytek aditiva
$\rho_r$	$\text{kg.m}^{-3}$	Hustota vodného roztoku močoviny
$\Delta\text{NO}_x$	$\text{mg.Nm}^{-3}$	Stupeň redukce
$\Delta\text{NO}_{x,\text{sk}}$	$\text{mg.Nm}^{-3}$	Skutečné množství ve spalínách
$Q_m$	$\text{kg.h}^{-1}$	Stechiometrická spotřeba roztoku močoviny
$Q_{m,\text{sk}}$	$\text{kg.h}^{-1}$	Skutečná spotřeba roztoku močoviny
$Q_{r,\text{sk}}$	$\text{l.h}^{-1}$	Skutečná spotřeba roztoku aditiva
$V_{\text{sp},v}$	$\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$	Objemový tok vlhkých spalín na výstupu z kotle
$V_{\text{vo}}$	%	Obsah $\text{H}_2\text{O}$ ve vlhkých spalínách

## 1 Úvod

Snižování emisí energetických zdrojů je jedním z cílů environmentální politiky ČR a EU. Evropská unie, která postupně zpřísňuje emisní limity, vyhotovila dokument pod názvem „Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants“, s novými platnými emisními limity od roku 2021. Česká republika vydala na základě mezinárodních závazků prostřednictvím Ministerstva životního prostředí rozšíření k dokument „Národní program na snižování emisí“, zabývající se snižováním emisních limitů do roku 2030.

Vzhledem k tomu, že během spalovacího procesu ve spalovací komoře dochází ke vzniku oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), oxidu siřičitého ( $\text{SO}_2$ ), oxidu uhelnatého ( $\text{CO}$ ), suspendovaných částic velikostních frakcí  $\text{PM}_{10}$  nebo  $\text{PM}_{2,5}$  a dalších škodlivin, které mají dopad na lidské zdraví a životní prostředí, je potřeba množství těchto znečišťujících látek snižovat.

Možnosti, jakým mohou být emisní limity  $\text{NO}_x$  na současných spalovacích zařízeních dodrženy, jsou dvěma způsoby. Primární opatření redukce oxidů dusíku, je způsob snižování úpravou spalovacího procesu. Sekundární způsob redukce je snižování již vzniklých  $\text{NO}_x$  buď ještě ve spalovací komoře, nebo v dalším traktu spalovacího zařízení.

Sekundární metody představují zejména redukci  $\text{NO}_x$  čpavkovými metodami. Jedná se o selektivní katalytickou redukci (SCR) a selektivní nekatalytickou redukci (SNCR), jejímž hlavním rozdílem je přítomnost katalyzátoru.

Metodou SNCR se snižuje množství oxidů dusíku pomocí chemické reakce amoniaku nebo močoviny při vstřikování reagentu mezi spalovací komoru a ekonomizér, do míst, kde je optimální teplota pro reakci v rozmezí 800–1100 °C.



Tabulka 1 Emisní limity na koncentrace  $\text{NO}_x$ 

Spalovací zařízení o jmenovitém tepelném výkonu ( $\text{MW}_t$ )	$\text{NO}_x$ , roční průměr ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )		$\text{NO}_x$ , denní průměr ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )		monitoring
	nový zdroj	stávající zdroj	nový zdroj	stávající zdroj	Kontinuální měření
<100	100-150	100-270	155-200	165-330	
100-300	50-100	85-150	80-125	140-165	
>300 fluidní kotel – černé a hnědé uhlí, práškový kotel – hnědé uhlí	50-85	85-150	80-125	140-165	
>300 práškový kotel – černé uhlí	65-85	65-150	80-125	85-165	

V tabulce jsou uvedeny základní hodnoty koncentrací  $\text{NO}_x$  bez výjimek. Pro řešený práškový kotel na hnědé uhlí o jmenovitém tepelném výkonu  $505,8 \text{ MW}_t$ , který byl uveden do provozu před datem 7. ledna 2014, platí výjimka stanovující limitní hodnotu koncentrace  $\text{NO}_x$  na  $220 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ .

## 2 Vliv oxidů dusíku na biosféru

Oxidy dusíku jsou spojeny hlavně se dvěma sloučeninami ovlivňující znečištění vzduchu: oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>). Jak již bylo zmíněno oxidy dusíku mají negativní vliv na lidské zdraví. První příznaky otravou se projevují pálením očí, či bolestí hlavy. Nejrizikovější je oxid dusičitý, který při vysoké koncentraci nebo nízké koncentraci a dobu minimálně 30 min, dráždí sliznici. Dlouhodobým následkem vystavením mohou vzniknout respirační problémy.

Díky tomu, že oxidy dusíku snižují poločas rozpadu u metanu a freonu, se podílejí na globálním oteplováním. Přítomnost v ovzduší zapříčiňuje vznik kyselých dešťů a následné okyselování povrchových vod, které se posléze projevuje uvolňováním mědi a hliníku z půdy a hornin.

## 3 Vznik oxidů dusíku

Na vzniku NO<sub>x</sub> se v největší míře podílí doprava a spalování ve stacionárních zařízeních. Z tohoto důvodu jsou největší koncentrace oxidů ve městech a průmyslových oblastech. Množství emisí NO<sub>x</sub> závisí na více faktorech. Záleží na typu kotle, typu paliva, které je spalováno.

Zásadními mechanismy tvorby oxidů dusíku při spalování jsou NO<sub>x</sub> palivové, NO<sub>x</sub> vysokoteplotní a NO<sub>x</sub> promptní.

### 3.1 Vysokoteplotní oxidy dusíku

Tvoří se při vysokých teplotách oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu. Vzniklé množství závisí na teplotě a době styku. Při teplotách vyšších než 1200 °C se tyto oxidy dusíku začínají tvořit ve značné míře. Postupným spalováním lze látky reagující dostat do zóny nižších teplot. Omezit tvorbu vysokoteplotních NO<sub>x</sub> můžeme snížením koncentrace O<sub>2</sub> v oblasti, kde teploty dosahují svého maxima, snížením doby setrvání v rozmezí nejvyšších teplot nebo snížením samotných teplot.

### 3.2 Palivové oxidy dusíku

Palivové  $\text{NO}_x$  vznikají oxidací dusíku přítomného v palivu. Veškerý dusík v palivu se nepřemění na  $\text{NO}$ , protože je v palivu organicky vázaný. Tento poměr se nazývá konverzní poměr a obvykle nabývá hodnoty do 3,5 %. Poměr  $\text{O} : \text{N}$  v uhlí a koncentrace  $\text{O}_2$  v blízkosti plamene má významný vliv na tvorbu  $\text{NO}$ , proto se snažíme omezit obsah  $\text{O}_2$  tak, aby bylo spalování s minimálním přebytkem.

### 3.3 Promptní oxidy dusíku

Tvorba promptních  $\text{NO}_x$  závisí na stechiometrii spalování a na teplotě. Vznikají přeměnou z molekulárního dusíku přes meziprodukty. Obsah promptního dusíku vzhledem k ostatním je u velkých spalovacích zařízení nízký.

### 3.4 Tvorba $\text{NO}_2$ a $\text{N}_2\text{O}$

Obsah  $\text{NO}_2$  ve spalínách je nízký. Jeho vznik je zapříčiněn prudkým ochlazením spalin a oxidací v komíně a kouřovodech.

Oxid dusný je jediný oxid ve spalínách, který způsobuje skleníkový efekt. Jeho obsah ve spalínách je nízký. Tvoří se při počátku spalování, kde je nízká teplota spalin. Z důvodu toho, že se rozkládá při vysokých teplotách spalování větší koncentrace  $\text{N}_2\text{O}$  se nachází u fluidních kotlů, které pracují s nižšími teplotami.

## 4 Snížování emisí oxidů dusíku

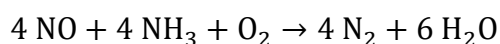
Množství oxidů dusíku lze omezit mnoha způsoby, ale vychází se ze dvou základních možností, jak toho dosáhnout. První možností je potlačování tvorby během spalovacího procesu, která se nazývá primární opatření. Sekundární opatření je založeno na odbourání již vzniklých  $\text{NO}_x$  pomocí chemické reakce reagentu a spalin. Protože jsou v současnosti nízké limity emisí, je zapotřebí použít obě varianty snížení těchto emisí dohromady.

## 4.1 Primární opatření

Potlačení tvorby oxidů dusíku lze způsobit úpravou spalování paliva. Nízké množství  $\text{NO}_x$ , vzniklé při spalování může být způsobeno postupným přidáváním vzduchu do hořáku, nebo snížením teplot ve spalovací komoře tak, aby se zabránilo tvorbě vysokoteplotních  $\text{NO}_x$ . Primární opatření se aplikuje ještě před sekundárním opatřením a jeho cena je ve vzájemném porovnání nižší.

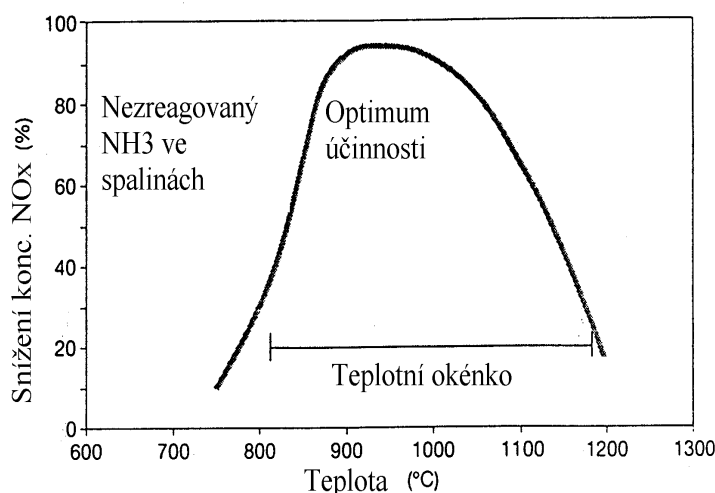
## 4.2 Sekundární opatření

Sekundárním opatřením se rozumí destrukce již vzniklých oxidů dusíku. Dělí se na suché a mokré procesy, ale používají se zejména suché procesy. Nejrozšířenější varianty jsou selektivní nekatalytická redukce a selektivní katalytická redukce, kde za přístupu amoniaku dochází k reakci s oxidy dusíku, díky tomuto se jedná o metody čpavkové. Hlavní rozdíl mezi těmito technologiemi spočívá v teplotním poli, do kterého je reagent vstřikován, a kde dochází k chemické reakci. Ekonomický faktor je důležitý dodatkem obou technologií. Náklady na pořízení technologie SNCR jsou výrazně nižší než u technologie SCR, bez ohledu na to, že tato metoda vyžaduje požadavek na zástavbové rozměry ve spalovacím traktu. Při použití sekundárních opatření probíhá nespočetně chemických reakcí, jejichž přesný průběh dodnes neznáme. Za základní reakci při použití čpavkové metody však považujeme následující.



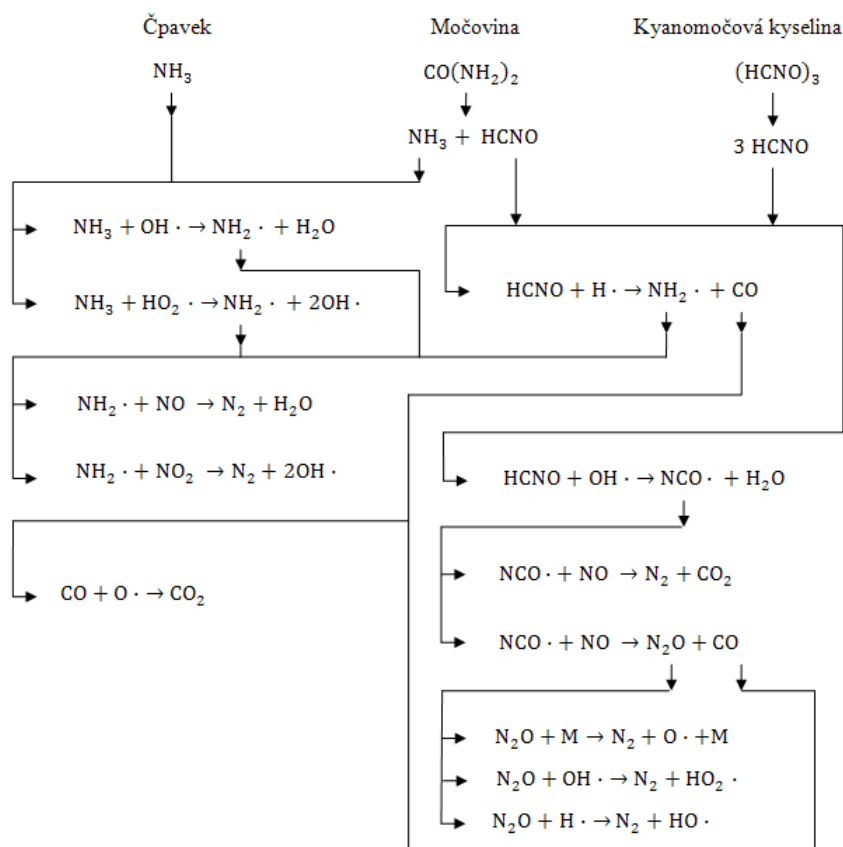
## 5 Metoda SNCR

SNCR, selektivní nekatalytická redukce, je sekundární metoda, která používá ke snížení hladiny  $\text{NO}_x$  vstřikování reagentu do spalovací části kotle. Použití technologie bývá problematické, jelikož je zapotřebí teplotní okno s úzkým rozsahem vysokých teplot (850–1050 °C) a díky tomu je považována za redukci termickou.



Obrázek 1 Graf závislosti SNCR na teplotě spalin

Podle látky, kterou je možné použít k chemické reakci se dělí do třech modifikací. Použití jakékoliv technologie je do své podstaty stejné. První z nich pod názvem NO<sub>x</sub>OUT, je systém, který k reakci se spalinami používá močovinu (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO. K chemické reakci dochází až po odpaření vody z jednotlivé kapičky, což zapříčiňuje hlubší penetraci do toku spalin a tím se může snížit redukce. Špatně nastaveným vstřikováním močoviny může dojít k porušení kotle např. přehříváku, na jehož povrch můžou dopadnout kapičky močoviny, kde začne reagovat s jeho materiálem. Druhá modifikace metody SNCR, DeNO<sub>x</sub>, spočívá v použití čpavku (NH<sub>3</sub>), zejména v kapalném stavu v podobě čpavkové vody (NH<sub>4</sub>OH), vstřikovaného do kotle. Voda obsažená v molekule čpavkové vody se začne odpařovat ihned po vstřiku do spalovací komory, přičemž při optimálních teplotách současně dochází k reakci s NO<sub>x</sub>. Nejméně používanou metodou je proces RAPRENO<sub>x</sub>, používající kyselinu kyanomočovou (HCNO)<sub>3</sub> jako činidlo.

Obrázek 2 Reakční schéma redukce NO<sub>x</sub>

Upřednostnění roztoku močoviny může dojít z hlediska bezpečnosti při manipulaci a skladování, vzhledem k tomu že močovina není látka nebezpečná ani těkává.

Primární záležitostí při využívání SNCR je třeba dosáhnout požadovaných limitů NO<sub>x</sub> a zbytkového čpavku ve spalinách. Posléze se garantují hodnoty spotřeby reagentů a demineralizované vody k míšení s reagentem a vzduchu potřebného ke vstřiku.

## 5.1 Jednotlivé části technologie SNCR

Z firemních realizací technologie a dlouholetých zkušeností s instalací je známo použití následujících částí, které se dělí do dvou skupin. První z nich je samotné skladování reagentu a jeho doprava k míchacímu a měřicímu modulu. Druhou je samotný měřicí a míchací modul a následné rozvětvení pomocí trubek, na jejichž konci jsou umístěny vstřikovací kopí.

Skladování reagentu je nejčastěji umístěno mimo budovu kotelny, pomocí zásobní nádrže. S použitím čerpadel je látka potrubím přiváděna k měřicí a míchacímu modulu. V případě umístění mimo kotelnu je zapotřebí, aby byla zásobní nádrž s dopravními trasami

izolována a vyhřívána. Nebyly by vyhřívány, došlo by při nižších venkovních teplotách ke krystalizaci reagentu.

K měřicímu a míchacímu modulu je společně s reagentem přiváděna i demineralizována voda a tlakový vzduch. Reagent je zde smíchán s demivodou, jejichž poměr je nastavován podle potřeby regulačním pneumatickým ventilem a následně větven podle počtu vstřikovacích kopí. Na jednotlivých větvích jsou umístěny regulační jednotky jako kulové nebo jehlové ventily a měřicí části v podobě manometru na měření tlaku a plovákových průtokoměru na potřebné nastavení průtoku směsi. Tlakový vzduch je v modulu regulován redukčním ventilem. Vedle měřicího a míchacího modulu je umístěn modul řídicí s ovládacím panelem, který zařizuje automatismus celého procesu. Software zpracovává vstupy a výstupy z měřicího modulu a z měření koncentrace spalín a teplot, které vyhodnocuje a následně mění průtoky močoviny a demivody na regulačním ventilu, popřípadě mění úroveň vstřikování. Vzduch musí proudit i právě nepoužívanými kopími, protože v tomto případě je strůjcem chladicího efektu a zabráňuje zničení trysek a trubek kopí.

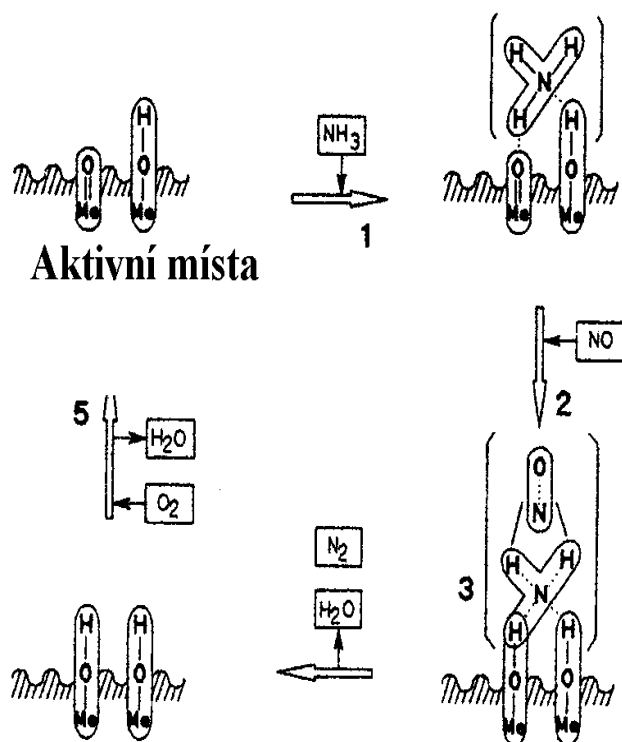
Z modulu putuje trubkami směs odděleně s tlakovým vzduchem k jednotlivým otvorům kotle určené ke vstřikování, které se nacházejí ve více úrovních. Otvory a jejich počet se určuje na základě provedených měření teplot a případné vizualizace toku spalín a možnostmi kotelny k dostatečnému prostoru k instalaci. Otvory jsou vybudovány pomocí přírub s kamloky na uchycení vstřikovacích kopí. Nezbytností je umístění vybraného kontinuálního měření teplot do kotle, zvyšující maximální přesnost k použití dané vstřikovací úrovně. K měření se může použít optický pyrometr, akustické měření teplot nebo měření termočlánkem.

Vstřikovací kopí je složeno z míchací komory, vnitřní trubky, ochranné trubky a trysky. V míchací komoře dochází k promísení vzduchu a směsi, která putuje vnitřní trubicí k trysce zaručující rozstřík v kotli. Ochranná trubka chrání trubku vnitřní, aby nedošlo k její deformaci.

Dopravní trasa je zkonstruována z nerezových trubek z důvodu agresivních látek směsi. Vnitřní a ochranná trubka musí být vyrobena z žáruvzdorné oceli kvůli kontaktu s vysokými teplotami v kotli.

## 6 Metoda SCR

Metoda SCR využívá povrch katalyzátoru ke zvýšení chemické selektivní reakce mezi  $\text{NO}_x$  a čpavkem za vzniku vodíku a vody. Podle potřeby lze katalyzátor umístit do třech lokací spalovacího traktu.



Obrázek 3 Mechanismus SCR podle Eley-Rideala

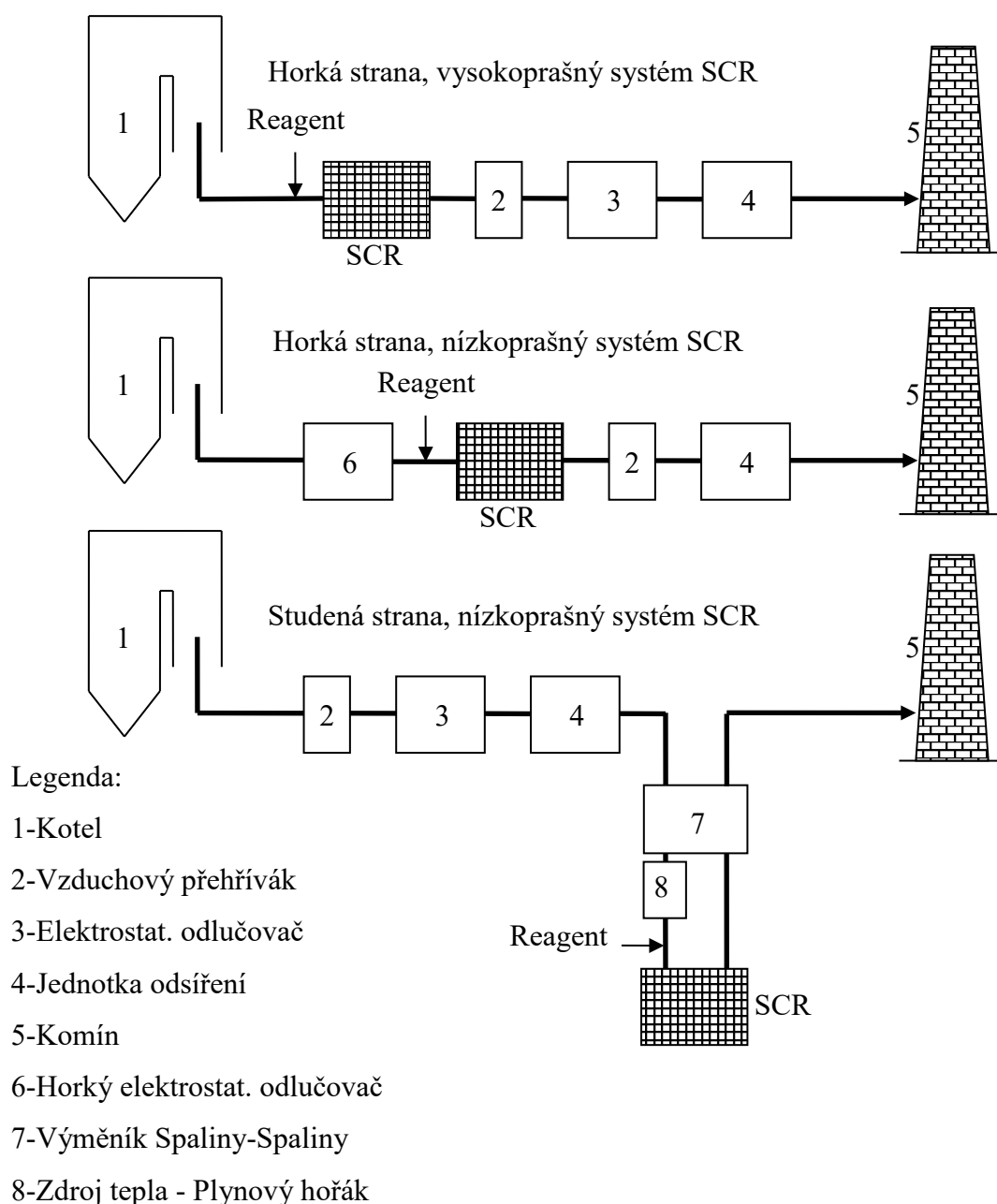
Reaktor SCR tzv. Hot-side, high-dust system je vměstnán mezi ekonomizérem a ohřivačem vzduchu. Denitrifikované spaliny až poté putují do vysokoteplotního odlučovače. Hlavní nevýhoda této varianty spočívá ve spalinách obsahující velké množství prachu a nečistot, které vyvolává zanesení pórů katalyzátoru a snižuje jeho životnost. Zároveň to způsobuje delší dobu potřebnou pro reakci, proto je nutné plochu katalyzátoru navrhnout rozměrnější. Tato možnost je zástavbově náročná a ze všech ekonomicky nejnákladnější.

Hot-side, low-dust system, neboli Horká strana, nízkoprašný systém je alternativa, při kterém je reaktor umístěn za elektrostatickým odlučovačem a proto do něj vstupují spaliny již odprášené. Pořízení elektrostatického odlučovače je zapříčiněno vysokou cenou



a katalyzátor je zatížen usazováním velmi jemného prachu nezachyceného v odlučovači a tvorbou síranu amonného a hydrogenu síranu amonného.

Cold-side, low-dust system je modifikací umístěnou na samém konci spalovacího traktu, jenž se díky tomu označuje také jako Tail-end. Není potřebná velká aktivní plocha, protože jsou nežádoucí látky odstraněny odlučovačem nebo odsiřovačem. Teplota spalin před vstupem do reaktoru je již nízká, proto je nutné instalovat dodatečný ohřev. Vysoké náklady na dohřev jsou největší nevýhodou. Tento typ se používá zejména u spaloven, kde je nezbytné důsledné odstranění kyselinotvorných plynů.



Obrázek 4 Blokové schéma jednotlivých variant SCR

Katalyzátory se vyrábějí jako blokové s vylišovanými otvory, deskové a peletizované. Blokové katalyzátory s vylišovanými otvory je složen z keramické podložky, na který je nanesen nosič, nejčastěji oxid titaničitý  $\text{TiO}_2$ , a aktivní složka např. oxid vanadičný  $\text{V}_2\text{O}_5$  nebo oxid wolframový  $\text{WO}_3$ . Deskový katalyzátor je složen ze dvou desek, jejíž vzdálenost se mění v závislosti na obsahu popílku ve spalínách. Peletizovaný katalyzátor se používá ve formě aktivního uhlí nebo zeolitech, které jsou uloženy v nehybné vrstvě, nebo fluidním loži. Pracovní teplotní pole SCR je výrazně nižší než SNCR a pohybuje se od 80 °C do 450 °C.

Otravou stopovými prvky, usazováním prachu a jiných sloučenin a erozí nastane deaktivace katalyzátoru. Otravou se rozumí blokování či poškození aktivních míst prvky vázající se na katalyzátor. Arzen, obsažený v uhlí, se při teplotách nad 1400 °C váže s kyslíkem a následným ochlazováním se váže na popílek, jež je nejčastější příčinou otravy katalyzátoru. Přebytkem amoniaku se tvoří síran amonný a hydrogen síran amonný, který se usazuje na aktivní plochu katalyzátoru. Při vysokých rychlostech spalin přes katalyzátor přivodí popílek spalin erozi katalyzátoru naneseného na podložce.

Životnost katalyzátoru závisí na druhu používaného paliva. Opotřebení katalyzátoru se pozná nárůstem  $\text{NH}_3$  ve spalínách.

## 7 Chemismus procesu

Chemické reakce močoviny, čpavkové vody a kyseliny kyselinové s oxidy dusíku si jsou do jisté míry podobné. Zřejmě největší rozdíl je v rychlosti reakce jednotlivých látek. Močovina se vstříkuje do spalovací komory ve formě vodného roztoku do teplotního rozmezí od 870 °C do 1150 °C. Následkem vysoké teploty ve spalovací komoře jsou kapičky vodného roztoku velice rychle ohřáté. Dochází k současnému odpařování vody s malým množstvím 10 % močoviny a jakmile je veškerá voda odpařena dochází k rozpadu močoviny, která sublimuje, čímž je pevná částice močoviny rozložena na  $\text{NH}_3$  a  $\text{HCNO}$ . Je známo, že se aktivní látka dostane hlouběji do spalovací komory, do toku spalin s vyšší teplotou a větším obsahem  $\text{NO}_x$ , z čehož může plynout lepší účinnost redukce. Molekula močoviny nese ve své struktuře atom uhlíku, pramenící ke zvýšení emisí  $\text{CO}_2$ .

Redukce  $\text{NO}_x$  pomocí čpavku probíhá v teplotním okně od 830 °C do 1100 °C s ostrým maximem závislejícím na lokálních podmínkách. Reakce vodného roztoku čpavku se

odlišuje svým průběh od močoviny. Čpavková voda je nebezpečná a těkává látka, a právě díky její těkavosti reaguje ihned po vstupu do spalovací komory, čímž dojde k postupnému uvolňování aktivní látky společně s molekulami vody.

Nežádoucím jevem při provozování čpavkových metod je vznik zbytkové hladiny  $\text{NH}_3$ , tzv. čpavkový skluz, který nestihl zreagovat. Vysoká hladina čpavkového skluzu může být indikátorem vstřikování do nízkých teplot, z čehož může plynout i nevhodně navržený prostup pro vstřikování a vede ke tvorbě amonných solí (síran amonný, hydrosíran amonný a chlorid amonný). Výhodou se stává při kombinaci technologií SNCR a SCR. Nevyužitý čpavek vstupuje do katalyzátoru, kde při nižších teplotách potřebné k uvolnění, znovu reaguje s oxidy dusíku.

Při využívání SNCR je třeba dosáhnout požadovaných limitů  $\text{NO}_x$ , a posléze se hledá největší účinnost redukce a množství čpavkového skluzu společně se spotřebou určitého reagentu.

## 8 Popis kotle

Kotel je součástí elektrárenského komplexu se čtyřmi výrobními bloky. Každý výrobní blok je s tepelným příkonem  $574,7 \text{ MW}_t$  a tepelným výkonem  $505,8 \text{ MW}_t$  se skládá z kotle, turbíny s generátorem a blokového transformátoru. Kotle jsou zkonstruovány jako membránové, průtlaché, dvoutahové s granulačním ohništěm s přímým foukáním uhelného prášku do spalovací komory.

Bojlery jsou opatřeny přehřívákem páry, ekonomizérem, rotačními ohříváky vzduchu a dvěma třisekcovými elektrostatickými odlučovači popílku. Spaliny putují kouřovými kanály přes ohříváky vzduchu do elektrostatického odlučovače, k odloučení popílku. Poté jsou odváděny do odsiřovací jednotky pomocí kouřového ventilátoru. Pára, o vlastnostech uvedených v tabulce, míří na kondenzační turbíny s osmi odběry páry.

Stávající průměrné emise  $\text{NO}_x$  dosahují úrovně 240 až  $260 \text{ mg/Nm}^3$  při provozu standartního režimu.

Tabulka 2 Základní parametry kotle

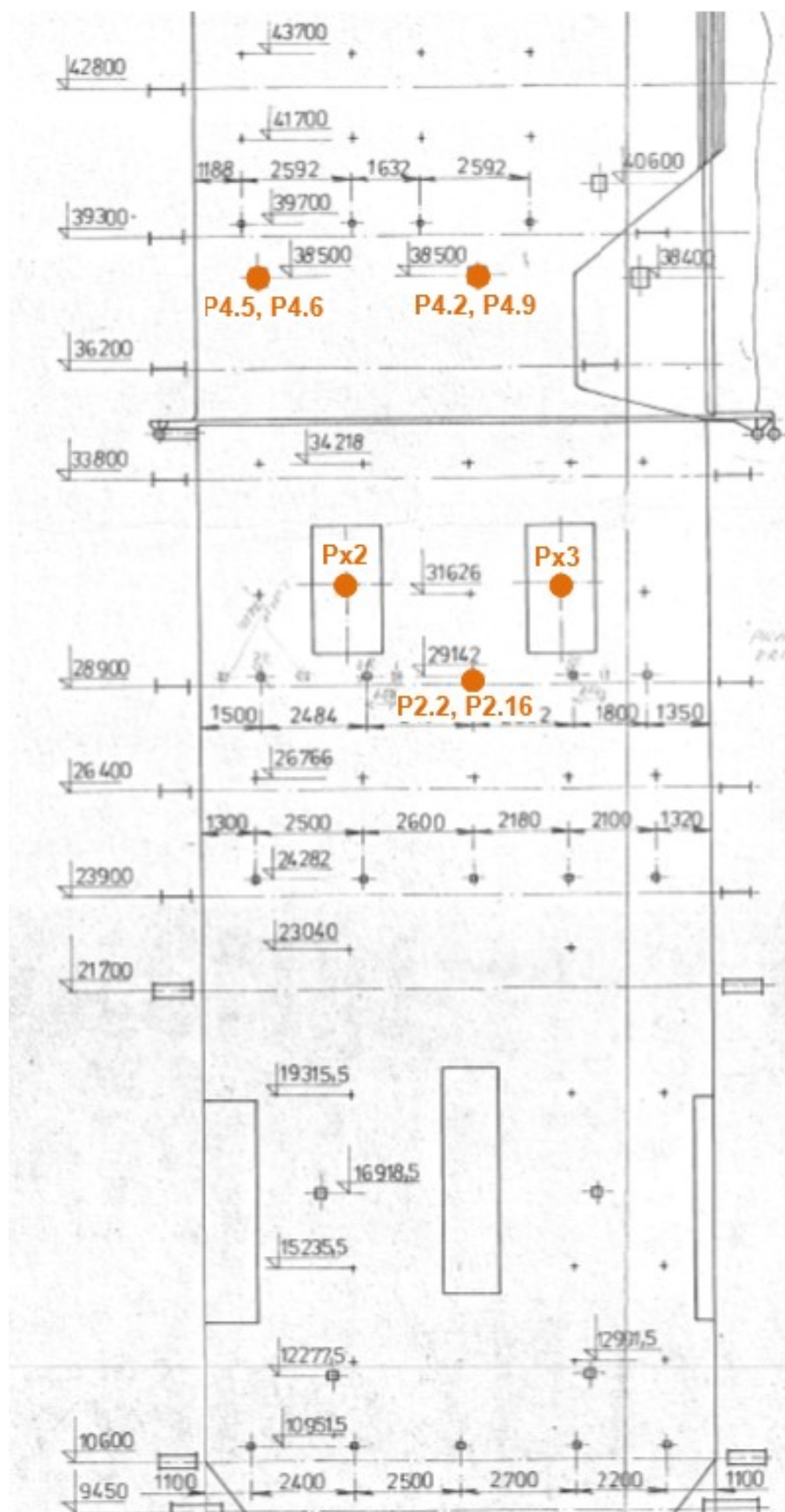
Položka	Jednotka	Hodnota
Jmenovitý parní výkon	t/h	655
Hospodárny parní výkon	t/h	541
Minimální parní výkon bez stabilizace	t/h	310
Minimální elektrický výkon bez stabilizace	MW	100
Nejvyšší tlak páry za přehřívákem	MPa	17,9
Jmenovitý tlak páry za přehřívákem	MPa	17,0
Jmenovitá teplota přehřáté páry	°C	541
Jmenovitá teplota přehřáté páry	°C	541
Jmenovitá teplota napájecí vody	°C	252
Vstupní tlak do přehříváku při jmenovitém výkonu	MPa	4,1
Výstupní tlak z přehříváku při jmenovitém výkonu	MPa	3,85
Nejvyšší tlak páry za přehřívákem	MPa	4,5
Vstupní teplota páry do přehříváku	°C	349

## 9 Měření teplot

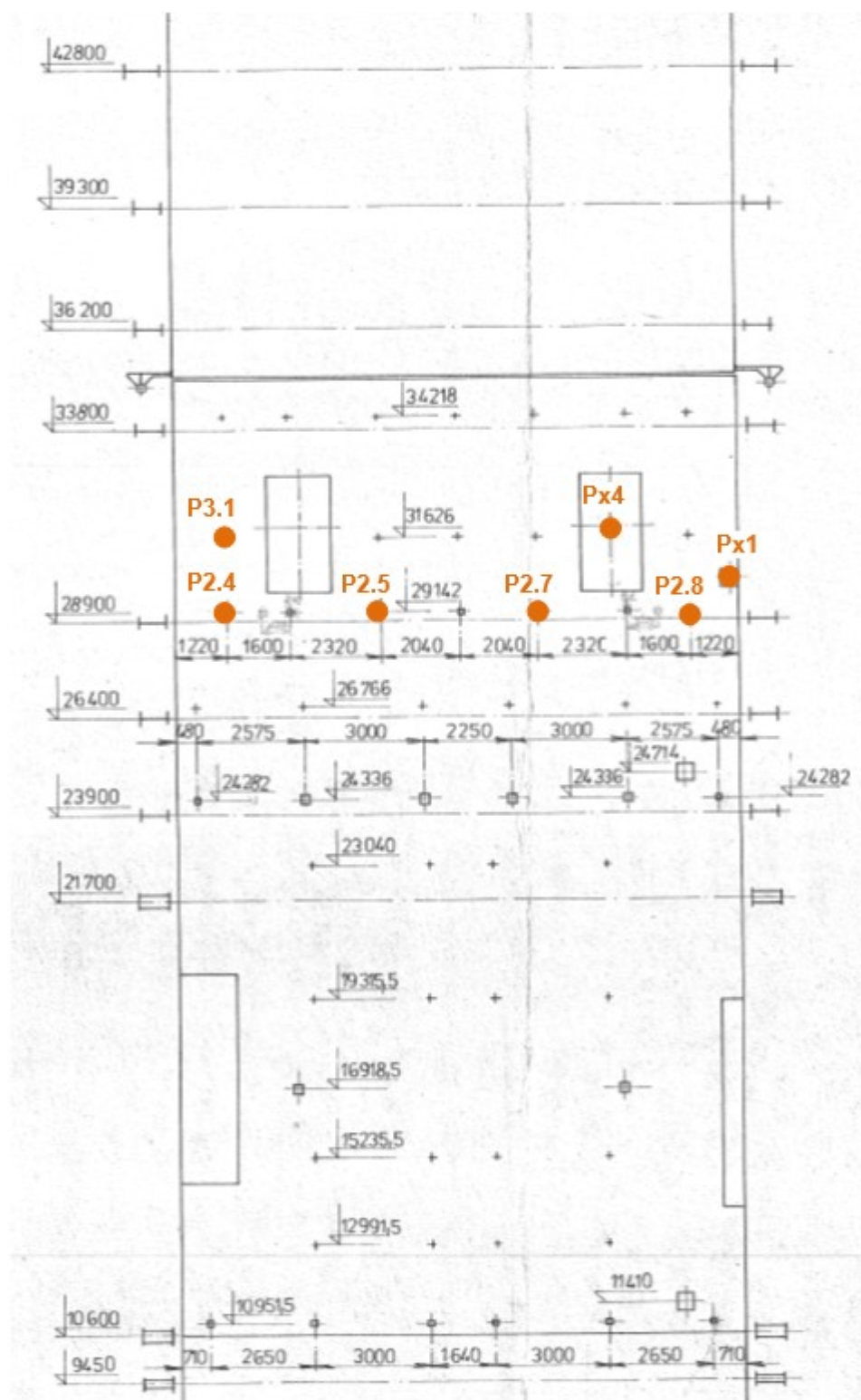
Měření teplot spalín bylo realizováno při maximálním a středním výkonu kotle. Pro měření byly využity stávající prostupy do spalovací komory kotle, které slouží jako revizní průlezy a průzory a pro uchycení lešenářské konstrukce. Lokace měření je uvedena v následující tabulce a pozice jsou zakresleny na obrázcích 4,5 a 6.

Tabulka 3 Seznam měřicích míst

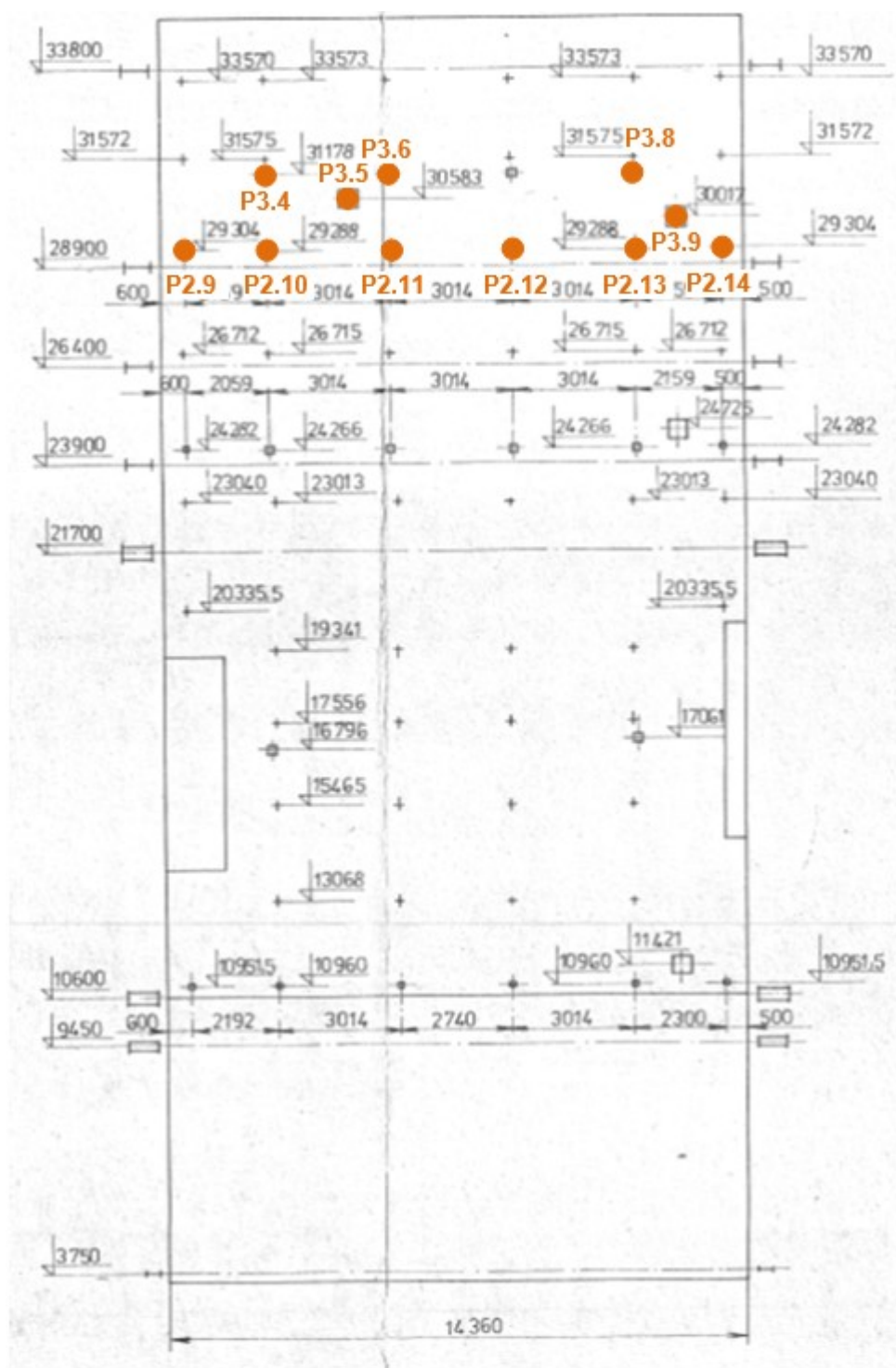
Pořadí	Prostup	Hladina [m]	Popis
1.	P2.2	+29,142	prostup na levé stěně kotle, u osy kotle
2.	P2.4		prostup na čelní stěně kotle, u první stěny kotle
3.	P2.5		prostup na čelní stěně kotle, blíže k první stěně kotle
4.	P2.7		prostup na čelní stěně kotle, blíže k levé stěně kotel
5.	P2.8		prostup na čelní stěně kotle, u levé stěny kotle
6.	P2.9	+29,304	prostup na zadní stěně kotle, u levé stěny kotle
7.	P2.10	+29,288	prostup na zadní stěně kotle, blíže k levé stěně kotle
8.	P2.11		prostup na zadní stěně kotle, u osy kotle
9.	P2.12		prostup na zadní stěně kotle, u osy kotle
10.	P2.13		prostup na zadní stěně kotle, blíže k pravé stěně kotle
11.	P2.14	+29,304	prostup na zadní stěně kotle, u pravé stěny kotle
12.	P2.16	+29,142	prostup na pravé stěně kotle, u osy kotle
13.	P3.1	+31,626	prostup na čelní stěně kotle, u pravé stěny kotle
14.	P3.4	+31,178	prostup na zadní stěně kotle, u levé stěny kotle
15.	P3.5	+30,583	prostup na zadní stěně kotle, blíže k levé stěně kotle
16.	P3.6	+31,178	prostup na zadní stěně kotle, u osy kotle
17.	P3.9	+30,017	prostup na zadní stěně kotle, u pravé stěny kotle
18.	P4.2	+38,500	prostup na levé stěně kotle, blíže k zadní stěně kotle
19.	P4.5		prostup na levé stěně kotle, u přední stěny kotle
20.	P4.6		prostup na pravé stěně kotle, u přední stěny kotle
21.	P4.9		prostup na pravé stěně kotle, blíže k zadní stěně kotle
22.	Px1	+30,000	prostup na čelní stěně kotle, u levé stěny kotle
23.	Px2	+31,626	prostup v sušící šachtě na pravé stěně kotle, blíže k čelu kotle
24.	Px3		Prostup v sušící šachtě na pravé stěně kotle, blíže k zadní stěně kotle
25.	Px4		Prostup v sušící šachtě na čelní stěně kotle, blíže k pravé stěně kotle



Obrázek 5 Prostupy na bočních stranách kotle



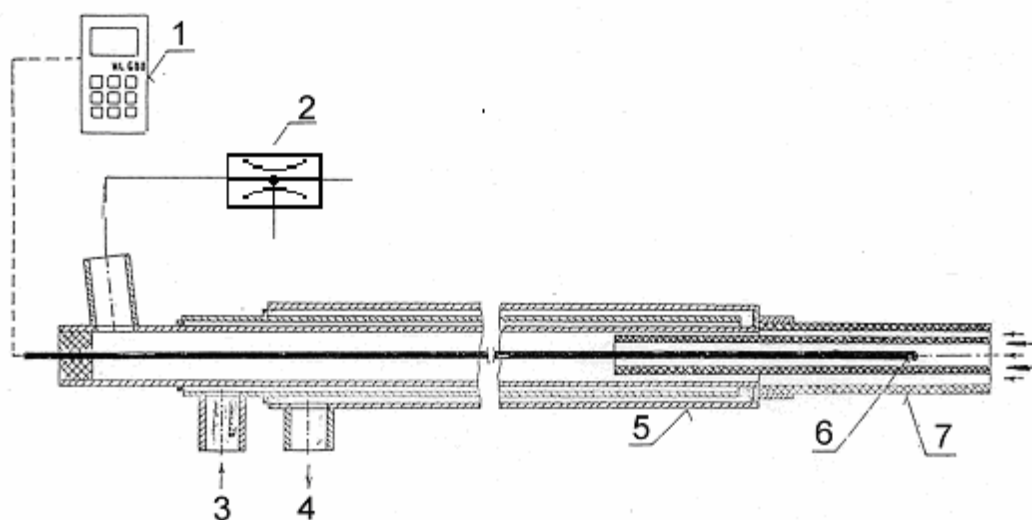
Obrázek 6 Prostupy na čelní straně kotle



Obrázek 7 Prostupy na zadní straně kotle



K měření teplot byl použit termočlánek typu K uvnitř vodou chlazeného prosávacího pyrometru délky 4 m, na jehož konci byla umístěna keramická hlavice. Provedeno bodovým kontaktním měřením. Vytvořený podtlak Venturiho trubicí, připojenou ke vzduchové části pyrometru, byly odsávány spaliny. Nasáváním spalin na teplý konec termočlánu byla změřena teplota, odpovídající skutečnosti. Jedná se o nejpřesnější dostupnou metodu k měření teplot v provozních podmínkách. Pyrometr je vyobrazen na obrázku 8. Zobrazení aktuální hodnoty i vypočteného minutového průměru teplot proběhlo na zařízení Testo 735.



Obrázek 8 Prosávací pyrometr

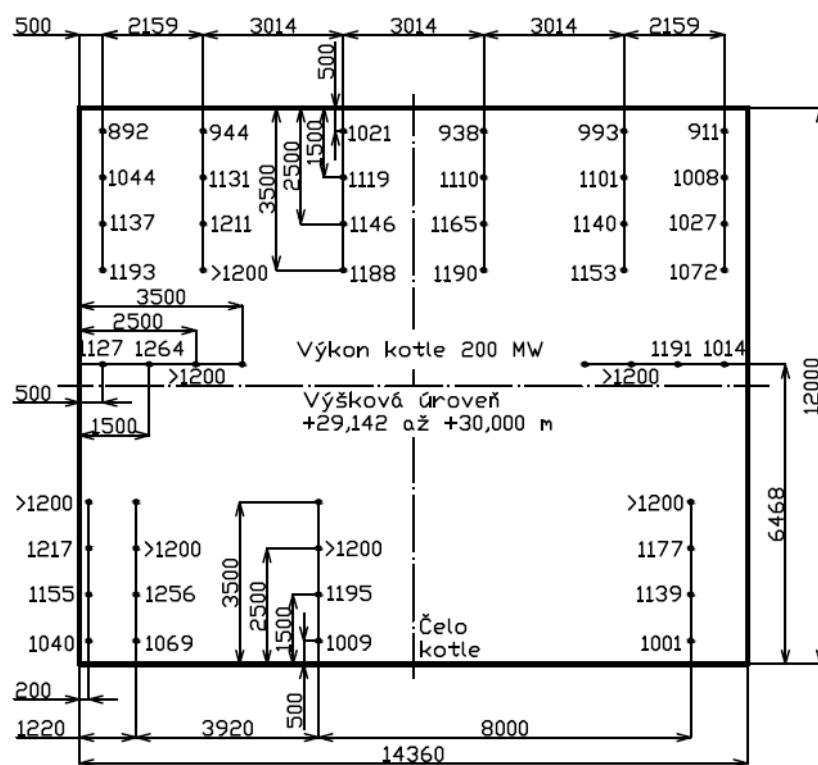
1 – Testo 735, 2 – Venturiho trubice, 3 – vstup chladicí vody, 4 – výstup chladicí vody, 5 – chlazená sonda, 6 – termočlánek, 7 – keramická hlavice,

## 10 Výsledky měření

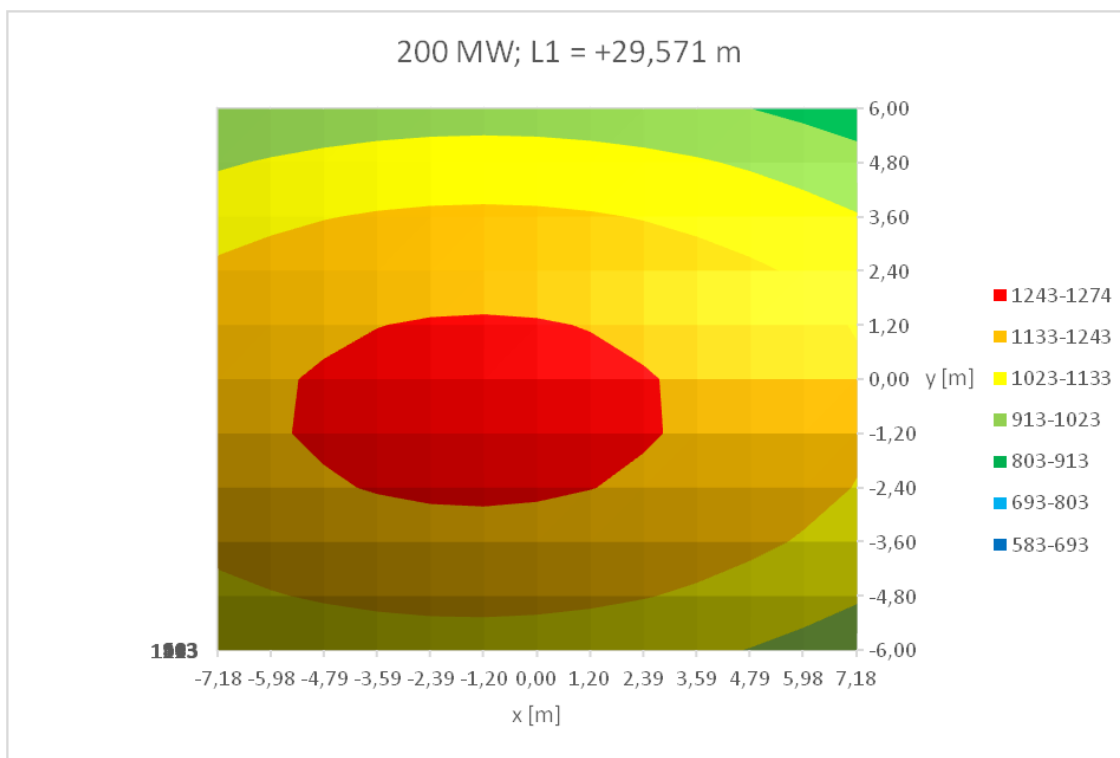
Výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách. Hloubka měřících bodů ve spalovací komoře byla 3500 mm, 2500 mm, 1500 mm a 500 mm.

Tabulka 4 Tabulka naměřených teplot při výkonu 100%

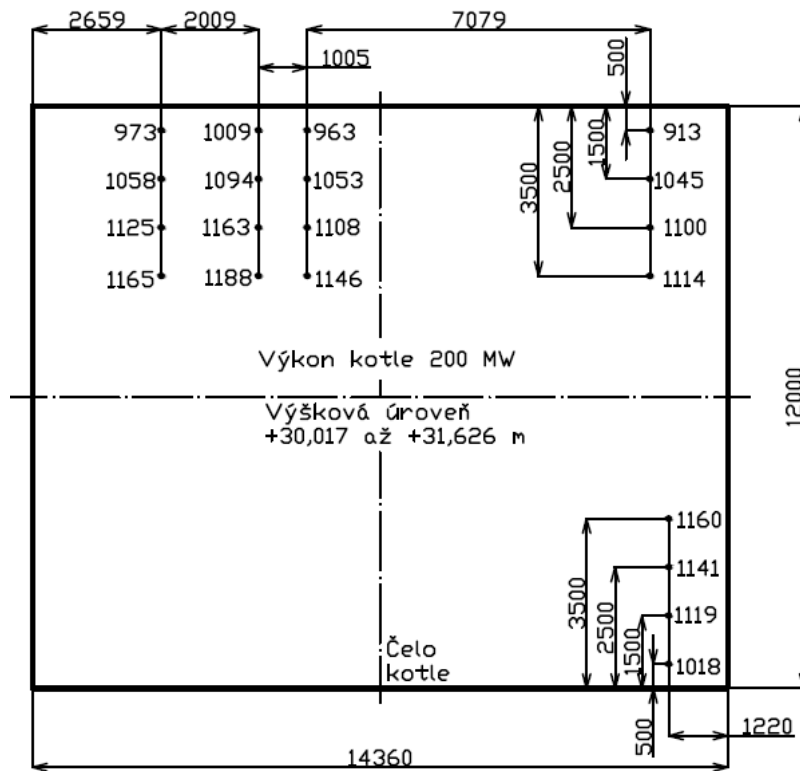
Prostup	Vzdálenost ve SK [mm]				Průměrná teplota
	500	1500	2500	3500	
[1]	Naměřená teplota [°C]				[°C]
P2.14	911	1008	1027	1072	<b>1005</b>
P3.9	913	1045	1100	1114	<b>1043</b>
P2.13	993	1101	1140	1153	<b>1097</b>
P2.12	938	1110	1165	1190	<b>1101</b>
P2.11	1021	1119	1146	1188	<b>1119</b>
P3.6	963	1053	1108	1146	<b>1068</b>
P3.5	1009	1094	1163	1188	<b>1114</b>
P3.4	973	1058	1125	1165	<b>1080</b>
P2.10	944	1131	1211	>1200	<b>1122</b>
P2.9	892	1044	1137	1193	<b>1067</b>
P2.2	1127	1264	>1200		<b>1197</b>
P2.16	1014	1191	>1200		<b>1135</b>
P2.4	1001	1139	1177	>1200	<b>1129</b>
P3.1	1018	1119	1141	1160	<b>1110</b>
P2.7	1009	1195	>1200		<b>1135</b>
Px1	1040	1155	1217	>1200	<b>1153</b>
P2.8	1069	1256	>1200		<b>1175</b>
Px4		862	781	675	<b>773</b>
Px3		847	880	808	<b>845</b>
Px2			783	768	<b>776</b>
P4.2	971	1005	1062	900	<b>985</b>
P4.5	851	886	977	936	<b>913</b>
P4.6	1043	1127	1163	>1200	<b>1133</b>
P4.9	1098	1133	1147	1131	<b>1127</b>



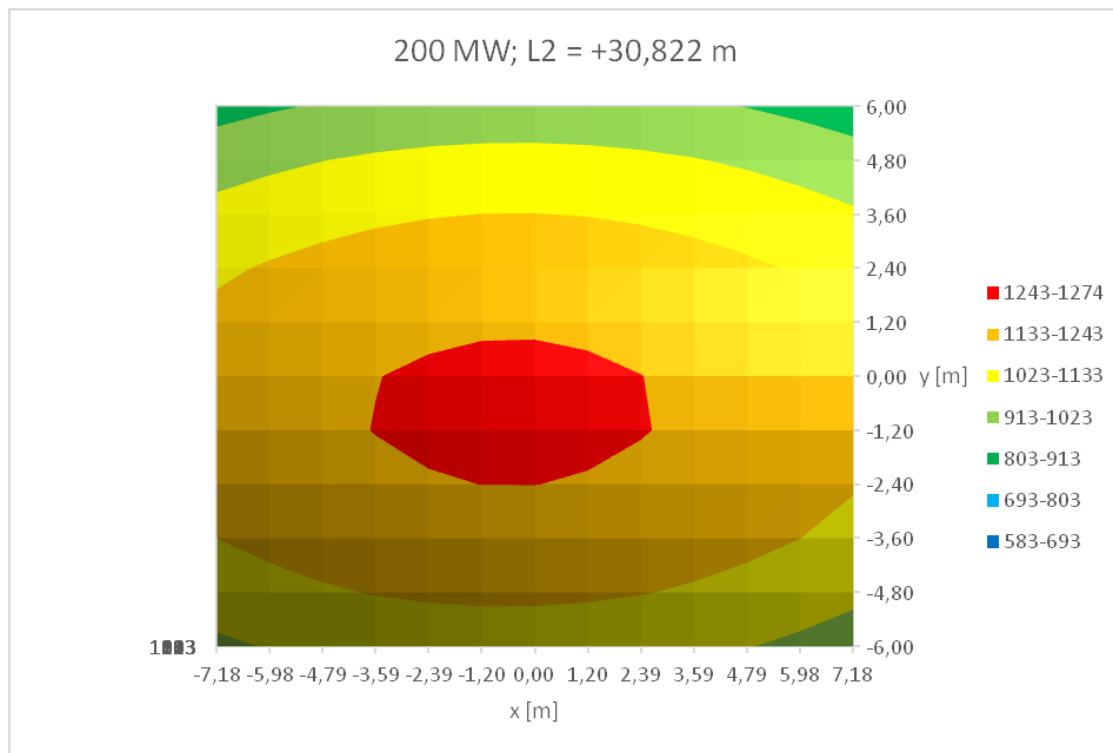
Obrázek 9 Průřez SK s naměřenými teplotami při maximálním výkonu



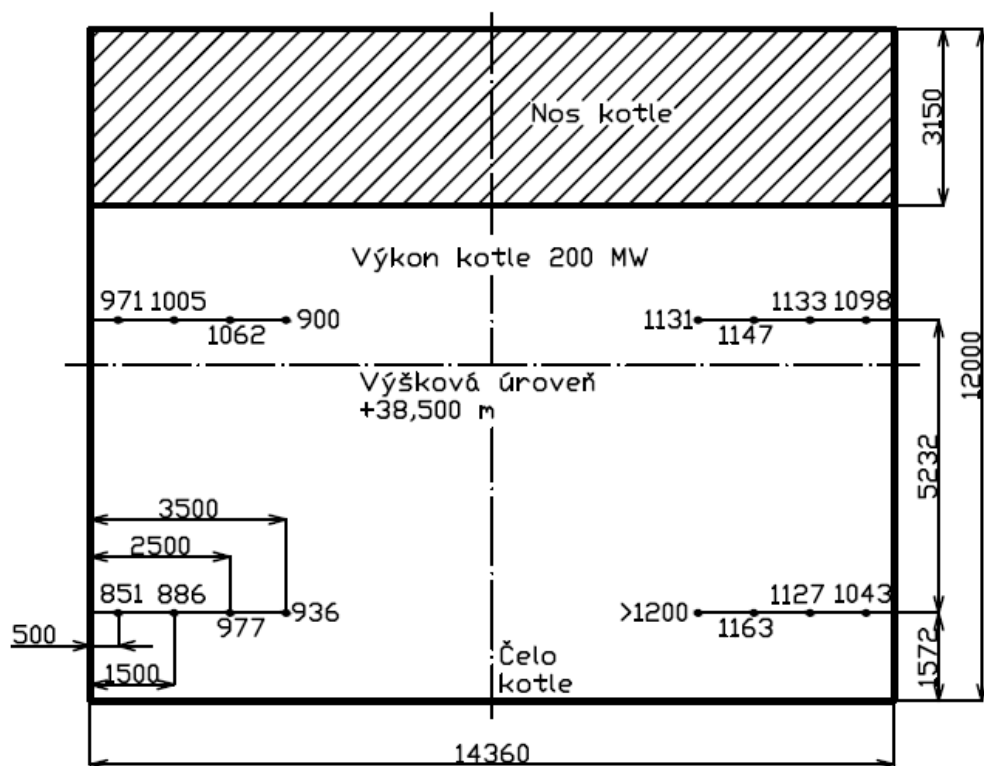
Obrázek 10 Teplotní profil v průřezu SK ve výšce +29,571 m při maximálním výkonu kotle



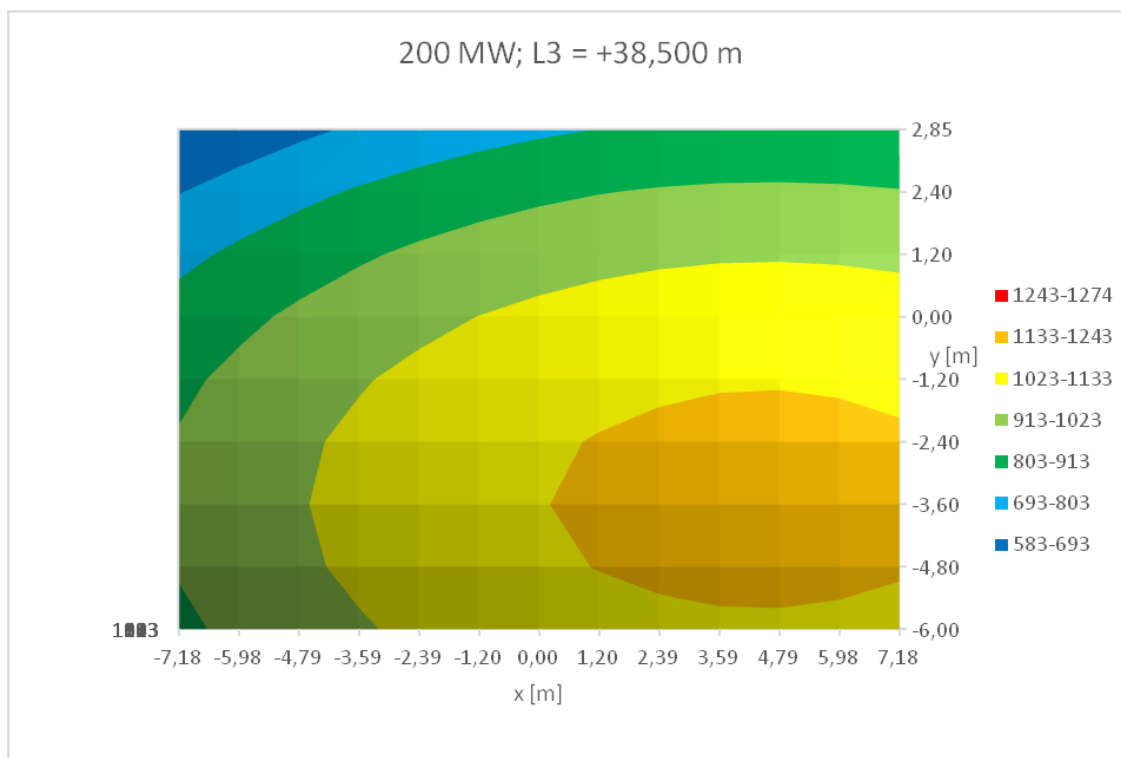
Obrázek 11 Průřez SK s naměřenými teplotami při maximálním výkonu



Obrázek 12 Teplotní profil v průřezu SK ve výšce +30,822 m při maximálním výkonu kotle



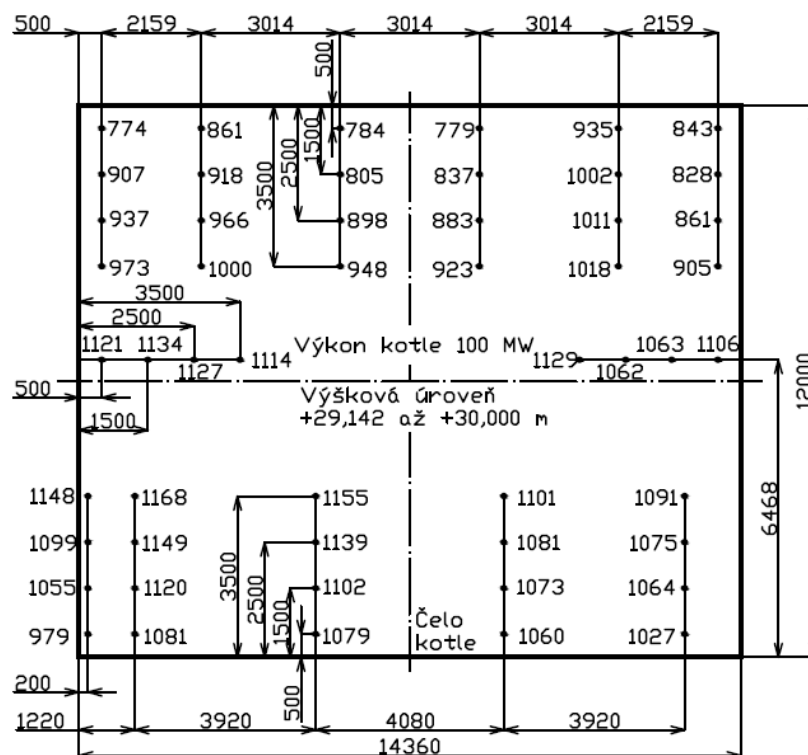
Obrázek 13 Průřez SK s naměřenými teplotami při maximálním výkonu



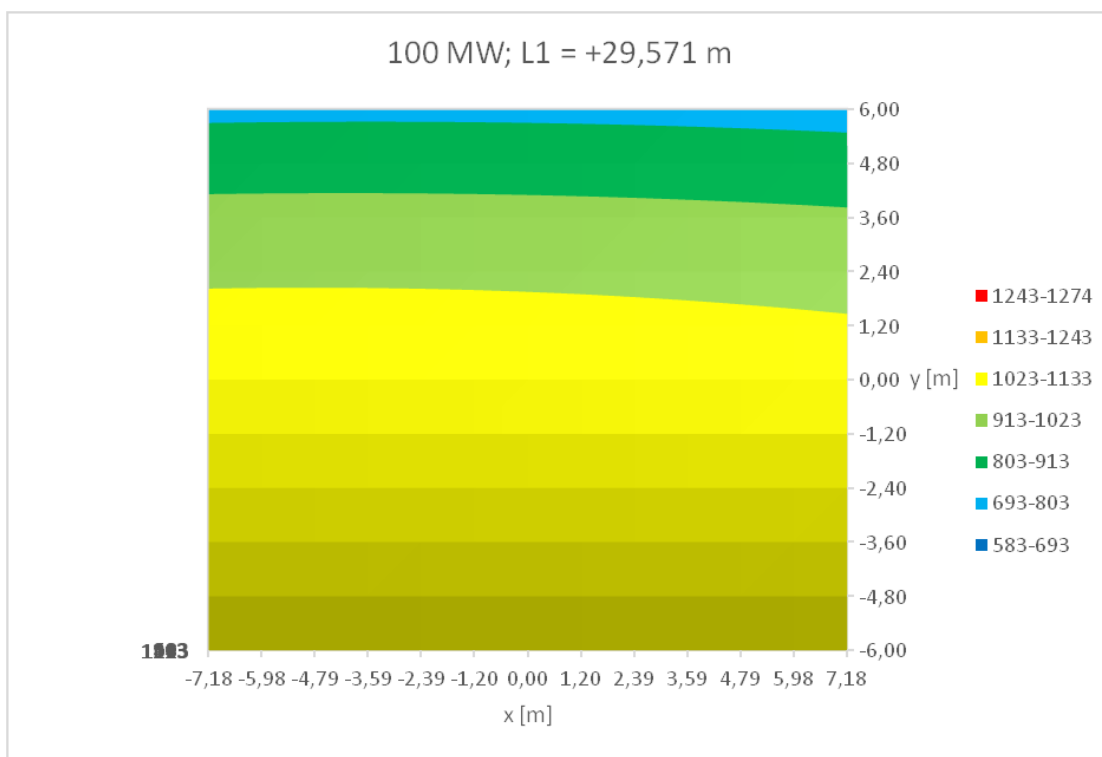
Obrázek 14 Teplotní profil v průřezu SK ve výšce +38,500 m při maximálním výkonu kotle

Tabulka 5 Naměřené teploty při minimálním výkonu kotle

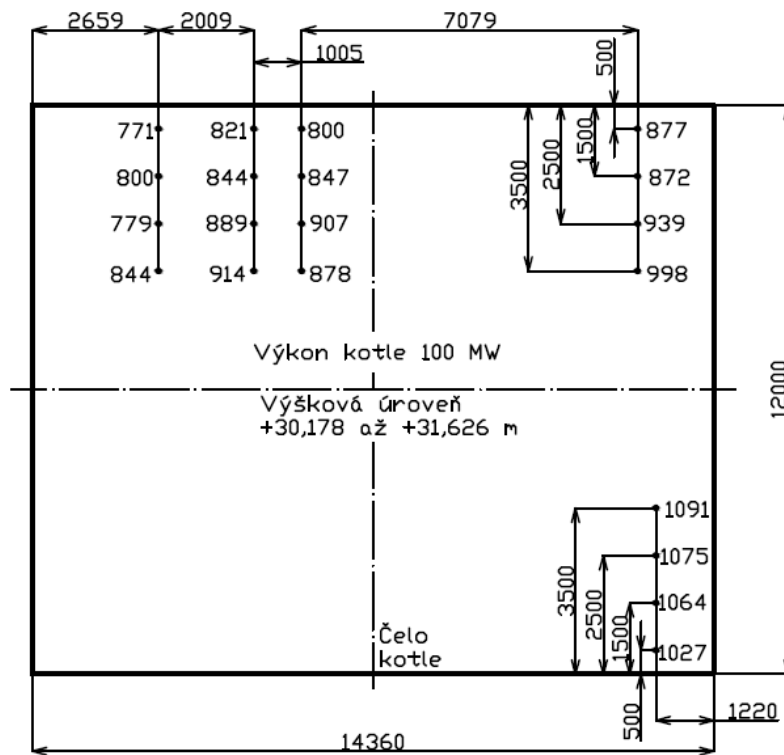
Prostup	Vzdálenost ve SK [mm]				Průměrná teplota
	500	1500	2500	3500	
[1]	Naměřená teplota [°C]				[°C]
P2.9	774	907	937	973	<b>898</b>
P2.10	861	918	966	1000	<b>936</b>
P3.4	771	800	779	844	<b>799</b>
P3.5	821	844	889	914	<b>867</b>
P2.11	784	805	898	948	<b>859</b>
P3.6	800	847	907	878	<b>858</b>
P2.12	779	837	883	923	<b>856</b>
P2.13	935	1002	1011	1018	<b>992</b>
P3.9	877	872	939	998	<b>922</b>
P2.14	843	828	861	905	<b>859</b>
P2.2	1121	1134	1127	1114	<b>1124</b>
P2.4	1027	1064	1075	1091	<b>1064</b>
P3.1	934	989	1009	1030	<b>991</b>
P2.5	1060	1073	1081	1101	<b>1079</b>
P2.7	1079	1102	1139	1155	<b>1119</b>
P2.8	1081	1120	1149	1168	<b>1130</b>
Px1	979	1055	1099	1148	<b>1070</b>
P2.16	1106	1063	1062	1129	<b>1090</b>



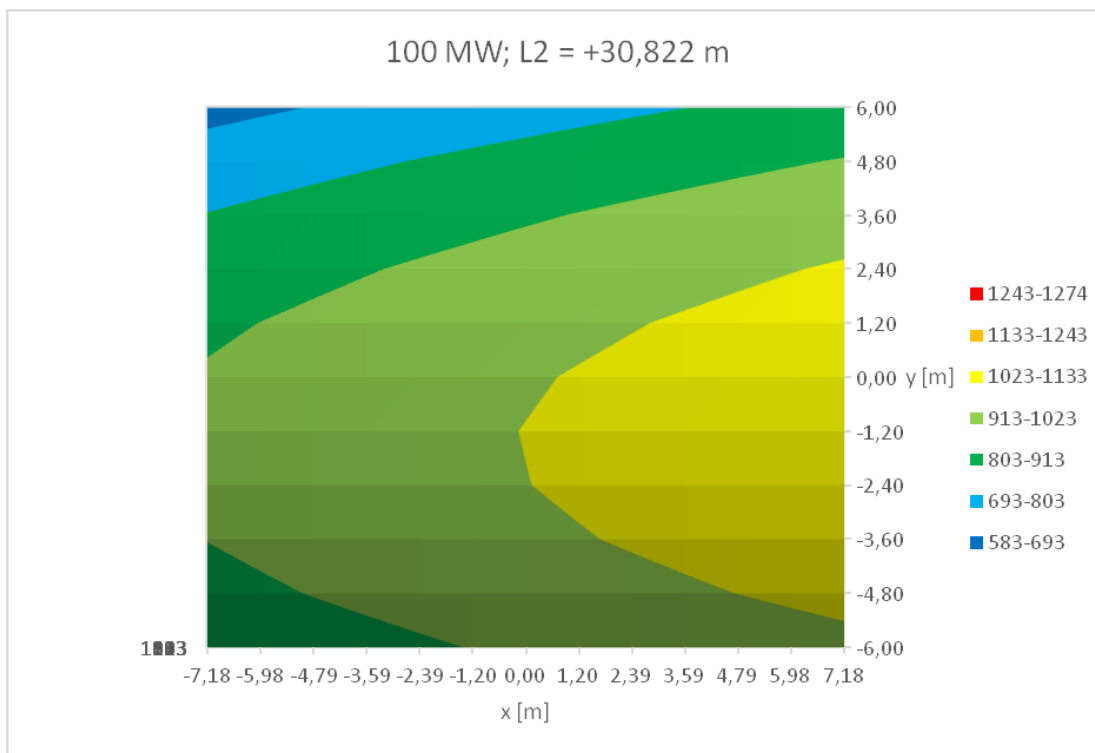
Obrázek 15 Průřez SK s naměřenými teplotami při minimálním výkonu



Obrázek 16 Teplotní profil v průřezu SK ve výšce +29,571 m při středním výkonu kotle



Obrázek 17 Průřez SK s naměřenými teplotami při minimálním výkonu



Obrázek 18 Teplotní profil v průřezu SK ve výšce +30,822 m při minimálním výkonu kotle



## **11 Návrh prostupů do SK kotle**

Vzhledem k požadavkům provozovatele bude použit rozstřík roztoku močoviny, pro kterou je optimální teplotní pole od 850 °C do 1050 °C. Z naměřených teplot vychází, že technologii SNCR lze použít pro provoz obou výkonů kotle. Je zapotřebí uvést, že naměřené teploty při maximálním výkonu jsou příliš vysoké, překračující 1050 °C. Navržením použití chladicí úrovně při maximálním výkonu snížíme teplotu spalin, aby nabývala hodnot k ideální redukci.

Podle naměřených teplot a prostorových možnostech kotelny navrhuji umístění vstřikovacích kopí do dvou úrovní. První úroveň bude ve výšce 29,500 m a druhá ve výšce 39,700 m. Ve druhé úrovni, těsně pod vstřikováním močoviny, bude umístěna chladicí úroveň.

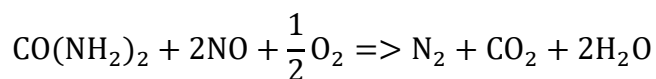
## **12 Výpočet spotřeby močoviny**

Pro výpočet minimální spotřeby reagentu jsou rozhodující parametry spalin, vystupující z kotle v běžných provozních stavech bez sekundárních opatření pro snížení emisí  $\text{NO}_x$ . Koncentrace a složení suchých a vlhkých spalin jsou uvedeny jako půlhodinové průměry. Hodnoty jsou uvedeny na výstupu z kotle.

Tabulka 6 Parametry spalín

<b>Položka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Provozní stav 100-205 MW<sub>e</sub></b>
Parní výkon kotle	t.h <sup>-1</sup>	300-640
Maximální objemový tok vlhkých spalín na výstupu z kotle – provozní rozsah	Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	1 000 000
Maximální koncentrace NO <sub>x</sub> v suchých spalínách při referenčním O <sub>2</sub> (6 %) – provozní rozsah	mg.Nm <sup>-3</sup>	350
Průměrná koncentrace NO <sub>x</sub> v suchých spalínách při referenčním O <sub>2</sub> (6 %) – provozní rozsah	mg.Nm <sup>-3</sup>	240-260
Garantovaná koncentrace NO <sub>x</sub> v suchých spalínách při referenčním O <sub>2</sub> (6 %) – provozní rozsah	mg.Nm <sup>-3</sup>	260
Obsah O <sub>2</sub> ve vlhkých spalínách – provozní rozsah	%	5
Obsah CO <sub>2</sub> ve vlhkých spalínách – provozní rozsah	%	9
Obsah H <sub>2</sub> O ve vlhkých spalínách – provozní rozsah (V <sub>vo</sub> )	%	16
Maximální koncentrace popela v suchých spalínách s aktuálním obsahem O <sub>2</sub>	g.Nm <sup>-3</sup>	70

Zjednodušená reakce pro redukci nám umožní výpočet spotřeby močoviny.



Stanovením hmotnosti močoviny CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> a 2NO dostaneme chybějící parametry pro výpočet. Hmotnosti jsou známy z Periodické tabulky prvků

Tabulka 7 Složky chybějící k výpočtu

Položka	Značka	Jednotka	Hodnota
Hmotnost $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	$M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	60,06
Hmotnost $2\text{NO}$	$M_{2\text{NO}}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	60,01
Hmotnost $\text{NO}$	$M_{\text{NO}}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	30,01
Hmotnost $\text{NO}_2$	$M_{\text{NO}_2}$	$\text{kg.kmol}^{-1}$	46,01
Koncentrace roztoku močoviny	$c$	%	45,00
Stechiometrický přebytek aditiva	$\alpha$	-	56,03
Hustota vodného roztoku močoviny	$\rho_r$	$\text{kg.m}^{-3}$	1122

Výpočet stupně redukce pro zadané parametry:

$$\Delta\text{NO}_x = \text{max. koncentrace NO}_x - \text{požadovaná koncentrace NO}_x = 350 - 200 \\ = 150 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Výpočet skutečného množství  $\text{NO}$  ve spalínách:

$$\Delta\text{NO}_{x,\text{sk}} = \Delta\text{NO}_x \cdot \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{NO}_2}} = 150 \cdot \frac{30,01}{46,01} = 97,84 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$$

Výpočet stechiometrické spotřeby roztoku močoviny:

$$Q_m = \frac{\Delta\text{NO}_{x,\text{sk}}}{M_{2\text{NO}}} \cdot M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2} \cdot V_{\text{sp},v} \cdot (1 - V_{\text{vo}}) = \frac{97,84}{60,01} \cdot 60,06 \cdot 1000000 \cdot \left(1 - \frac{16}{100}\right) \\ = 82,25 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Výpočet skutečné spotřeby roztoku močoviny:

$$Q_{m,\text{sk}} = Q_m \cdot \alpha = 82,25 \cdot 2,8 = 230,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Výpočet skutečné spotřeby roztoku aditiva:

$$Q_{r,sk} = \frac{Q_{m,sk}}{c} \cdot 100 = \frac{230,3}{45} \cdot 100 = 511,78 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\frac{Q_{m,sk}}{\rho_r} \cdot 1000 = \frac{511,78}{1122} \cdot 1000 = \mathbf{456,13 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}}$$

Při provozování kotle s limitním množstvím  $350 \text{ mg/Nm}^3$  by bylo zapotřebí  $456,13 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ . S přihlédnutím na to, že provozovatel garantuje při použití sekundárního opatření maximální hranici  $\text{NO}_x$  na  $260 \text{ mg/Nm}^3$ , je nutno provést výpočet znovu s použitím menšího stupně redukce.

Výpočet stupně redukce pro zadané parametry:

$$\begin{aligned} \Delta \text{NO}_x &= \text{garantovaná koncentrace NO}_x - \text{požadovaná koncentrace NO}_x = 260 - 200 \\ &= \mathbf{60 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}} \end{aligned}$$

Výpočet skutečného množství NO ve spalínách:

$$\Delta \text{NO}_{x,sk} = \Delta \text{NO}_x \cdot \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{NO}_2}} = 60 \cdot \frac{30,01}{46,01} = \mathbf{39,13 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}}$$

Výpočet stechiometrické spotřeby roztoku močoviny:

$$\begin{aligned} Q_m &= \frac{\Delta \text{NO}_{x,sk}}{M_{2\text{NO}}} \cdot M_{\text{CO}(\text{NH}_2)_2} \cdot V_{sp,v} \cdot (1 - V_{vo}) = \frac{39,13}{60,01} \cdot 60,06 \cdot 1000000 \cdot \left(1 - \frac{16}{100}\right) \\ &= \mathbf{32,90 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}} \end{aligned}$$

Výpočet skutečné spotřeby roztoku močoviny:

$$Q_{m,sk} = Q_m \cdot \alpha = 32,90 \cdot 2,8 = \mathbf{92,12 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}}$$

Výpočet skutečné spotřeby roztoku aditiva:

$$Q_{r,sk} = \frac{Q_{m,sk}}{c} \cdot 100 = \frac{92,12}{45} \cdot 100 = 204,71 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\frac{Q_{m,sk}}{\rho_r} \cdot 1000 = \frac{204,71}{1122} \cdot 1000 = \mathbf{182,45 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}}$$

Reálná spotřeba močoviny při redukci 60 mg/Nm<sup>3</sup> činí 182,45 l.h<sup>-1</sup> s ohledem na nejvyšší možný objemový tok spalin. Jedná se o vstupní hodnotu, která může být změněna k potřebám provozu kotle. Vzhledem k velikosti kotle a snahou pokrýt co největší plochu kotle bude instalováno do první úrovně ve výšce 29,5 m 10 kopí ke vstřikování a do druhé úrovně ve výšce 39,7 m 11 kopí ke vstřikování a 11 kopí ke chlazení.

## 13 Závěr

V teoretické části práce jsem se zabýval tvorbou oxidů dusíku a jejich rozdělení s vlivem na biosféru a zdraví jedince. Z těchto důvodů dochází k postupnému snižování emisí oxidů dusíku. Průmyslové podniky se spalovacími procesy investují značné finanční prostředky do zařízení snižující emise. V mé práci jsou uvedeny dva způsoby, jak snížit hladinu  $\text{NO}_x$ , tak aby byly nastavené zákonné limity dodržovány. Technologie SNCR je jednou z možností redukce, a proto jsou řešeny její jednotlivé části od skladování, dopravu, promísení až ke vstřikování do kotle pomocí kopí.

V části zaobírající se technologií SCR je nastíněno řešení jednotlivých variant umístění katalyzátoru, jejich výhody a nevýhody a rozdělení katalyzátoru dle materiálu.

Nedílnou součástí je řešení chemického procesu čpavkových metod a použití jednotlivých látek založené na amoniaku.

V praktické části je provedeno měření teplot ve spalovací komoře jednotlivými, již existujícími prostupy za provozu kotle. Následně jsou tyto data vyhodnocena, a i s ohledem na prostory kotelny jsou kopí umístěná do dvou pater. Vrchní úroveň je opatřena chlazením kvůli vysokým teplotám při maximálním výkonu kotle.

Na základě dodaných zbývajících parametrů kotle je vypočtena maximální možná spotřeba potřebná na redukci za kritických podmínek primárních opatření. Z množství oxidů dusíku  $350 \text{ mg/Nm}^3$  a následné redukce na  $200 \text{ mg/Nm}^3$  by bylo zapotřebí  $456,13 \text{ l.h}^{-1}$ . Posléze je vypočtena minimální spotřeba aditiva za garantovaných podmínek provozovatele, která stanovuje redukci o  $60 \text{ mg/Nm}^3$  s použitým množstvím aditiva  $182,45 \text{ l.h}^{-1}$ .

V příloze je schématické znázornění měřícího a míchacího modulu s rozdělením do jednotlivých větví, vedoucích k bodům vstřikování.

Technologie SNCR je levnější variantou oproti metodě SCR. Po prvotních nákladech je potřeba pouze nákup močoviny a případný servis. Se stále se zpřísnujícími limity lze pomocí této alternativy dosáhnout limitů i v budoucnu.

## 14 Použitá literatura

- [1] PECHÁČEK, J. *Snížení emisí Nox na granulačním kotli o výkonu 135 t/h pomocí SNCR a posouzení vlivu technologie na účinnost kotle*, Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2010, Diplomová práce
- [2] KOHL, A., NIELSEN, R. *Gas purification*, Fifth edition, Gulf Publishing Company, 1997
- [3] Soubor naměřených hodnot (archiv M&S Environmental Technologies s.r.o.)
- [4] HEGR, T. *Návrh zařízení pro denitrifikaci spalin metodou SNCR ve fluidním kotli*, Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012, Diplomová práce

## **15 Seznam příloh**

Příloha č. 1 Technologické schéma měřicího a míchacího modulu